



Etude de l'impact des rejets d'eaux usées brutes et épurées sur la qualité de l'Oued Bani Houat (Bassin de Sanaa) : Etude spatio-temporelle (Impact of raw and treated wastewater on quality surface water of Wadi Bani Houat (Sanaa Basin) Study spatial – temporal)

Kamal Abbas Merghem¹, Hassan El Halouani^{1*}, Anass Ali Alnedhary², Khadija Dssouli¹, Elkhadir Gharibi³, Raya Qaid Alansi⁴, Fuad al-Nahmi⁵

¹ *Laboratory of Water Science, Environment and Ecology, Faculty of Sciences, University Mohammed Premier, Oujda, Morocco*

² *Department of chemistry, Faculty of Khawlan, Sanaa University, Yemen*

³ *Laboratory of Solid Minerals and analytical chemistry 'LSMAC', Faculty of Sciences, University Mohammed I, Oujda, Morocco*

⁴ *Department of chemistry, Faculty of Sciences, Taiz University, Yemen*

⁵ *Laboratory Geosciences, Department of geology, Faculty of Sciences, University Hassan II Casablanca, Morocco*

Received 29 Nov 2015, Revised 28 Feb 2016, Accepted 10 Mar 2016

**Corresponding author. E-mail: elhalouanih@yahoo.fr*

Abstract

The aim of this study is to evaluate the physical and chemical quality of water surface of Bani Houat Wadi in the Sanaa Basin at Yemen. Which receive domestic and industrial pollution generated by the socio-economic development of the city of Sanaa. Wadi Bani Houat receives daily more than 70 000 m³ of waste water which treated and non-treated (by pass), over 20 000 m³ is discharged directly without any previous treatment. The results of this study revealed a spatial and temporal differentiation. The result of spatial study of Wadi Bani Houat showed a decreasing degree of pollution indicator parameters (BOD₅, COD, TSS, NH₄, NO₃, etc.) from the upstream to downstream of Wadi. The value of upstream stations (SO1, SO2, SO3) are characterized by a high load of organic matter and significant mineralization due to discharge of domestic and industrial wastewater in the Wadi. In the opposite, the downstream stations (BO1, BO2, and BO3) of the river are characterized by an improvement of the water quality, resulting in a significant decrease in the organic pollution and good oxygenation. And on the other hand, the results of physico-chemical of wadi during in the wet period (April to August) showed the improvement of quality of water due to the dilution phenomenon of most pollutants following the floods frequently in this area during the wet season. Although the intensification of discharge of domestic and industrial pollutants, Wadi Bani Houat still retains the characteristics of a natural aquatic ecosystem by implementing the self-purification processes for the relative improvement in the physico-chemical quality of the Wadi.

Keywords: Sanaa basin, Wadi of Bani Houat, physico-chemical quality, organic matter, nitrogen, phosphorus, self-purification processes.

Résumé

La présente étude a pour objectif de déterminer la qualité physico-chimique des eaux de surface de l'Oued Bani Houat du bassin de Sanaa au Yémen. Lequel est soumis à une pollution domestique et industrielle générées par le développement socio-économique de la ville de Sanaa. L'Oued Bani Houat reçoit quotidiennement plus de 70 000 m³ d'eau usée dont 50000 m³ sont traitées par la STEP de Sanaa et plus de 20 000 m³ sont déversés directement sans aucun traitement préalable. Les résultats des analyses ont fait ressortir une différenciation spatio-temporelle, le long du bassin versant de l'Oued Bani Houat, qui se traduit par un degré décroissant des paramètres indicateurs de la pollution (DBO₅, DCO, MES, NH₄, NO₃, etc.) en allant de l'amont vers l'aval. Les stations situées en amont (SO1, SO2, SO3) sont caractérisées par une forte charge en matières organiques et une importante minéralisation dues aux rejets domestiques et industriels. Par contre, les stations situées en aval de

l'oued (BO1, BO2 et BO3) se caractérisent par une amélioration de la qualité de leurs eaux qui se traduit par une diminution significative de la pollution organique et une bonne oxygénation. Sur le plan temporel, en période humide (avril-août) la qualité physico-chimique de l'eau de l'oued s'améliore grâce au phénomène de dilution de la plupart des polluants suite aux crues que connaît la région pendant cette saison. Par contre la période sèche caractérise par une forte concentration des polluants dans les eaux de l'oued pendant cette période. Malgré l'intensification des rejets polluants domestiques et industriels, l'oued Bani Houat conserve encore les spécificités d'un écosystème aquatique naturel en mettant en œuvre les phénomènes d'auto-épuration permettant l'amélioration relative de la qualité physico-chimique de l'oued.

Mots clés: Bassin de Sanaa, oued Bani Houat, eaux de surface, qualité physico-chimique, matières organiques, azote, phosphore, auto-épuration.

1. Introduction

Le Yémen est parmi les pays du Moyen-Orient qui souffre le plus de sécheresses et de stress hydrique. Le pays est soumis à des conditions climatiques extrêmes, avec un climat de type aride à semi-aride, et qui se caractérise par l'irrégularité des précipitations, des périodes de sécheresses intenses et persistantes. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 500 à 800 mm à l'Ouest sur les hauts plateaux, et moins de 50 mm le long des côtes de la mer Rouge et le Golfe d'Aden, avec des températures très élevées qui se font de plus en plus sentir depuis quelques années. Les sécheresses se succèdent dans des régions différentes du pays. Ce qui augmente le risque du stress hydrique qui ne fait que s'accroître avec les faibles précipitations menaçant l'agriculture dans le pays en général. Les ressources hydriques renouvelables sont estimées à 4.100 Milliard de m³/an, et environ 2.575 Milliard de m³/an d'eau de surface. On estime que la quantité d'eau disponible par habitant est seulement de 125 m³/hab/an, qui représente un dixième du seuil critique de stress hydrique communément évalué à 1000m³/hab/an. Ce volume était de l'ordre de 150 m³/hab/an en 2012 [1], ceci est une conséquence de l'exploitation très rapide et incontrôlée des ressources hydrique du pays. L'agriculture est considérée comme principale consommateur d'eau avec un taux de consommation totale d'environ 93% du total des ressources.

La ville de Sanaa, capitale du Yémen, suite à une augmentation croissante de la population qui a pratiquement doublé au cours des dix dernières années, elle est passée de 1,8 millions [2] pour atteindre plus de 2,5 millions d'habitants en 2013 [3]. La ville a connu une urbanisation rapide et un développement industriel en plein essor. Cette situation s'accompagne par une demande très importante en eau pour la consommation humaine, pour l'industrie et pour l'agriculture. Par conséquent, ce développement socio-économique, s'accompagne d'une augmentation à la fois des débits d'eaux usées rejetées et du degré de pollution des eaux superficielles, souterraines et de l'environnement générées par ces rejets. Malgré, l'existence d'une station d'épuration depuis les années 2000, cette station ne peut pas traitée tout le débit évacué par le réseau d'assainissement de la ville de Sanaa, seul 70 % de ces rejets sont traités, les 30 % restant sont déversées directement par un canal dans les eaux superficielles de l'Oued Bani Houat. Des études précédentes ont été effectuées sur la région mais d'une façon fragmentaires et sur des durées limitées de l'ordre de 3 mois et sur une courte distance au niveau de l'oued Bani Haouat ne dépassant généralement 3 km à partir des sources des pollutions, c'est le cas des études de Abd Al-Rahman Haider [4], PACER consultants[5] et de Al-Muselehi [6].

L'objectif principal de la présente étude est d'une part évaluer l'impact des rejets d'eaux usées brutes et épurées de la ville de Sanaa sur la qualité physico-chimique de l'oued Bani Houat sur la totalité de sa longueur (25 km) et sur une durée d'une année et d'autre part de vérifier si l'Oued Bani Houat présente toujours les spécificités d'un écosystème aquatique. Cette étude consiste à l'évaluation spatio-temporelle de la qualité physico-chimique des eaux de l'oued Bani Houat. Plusieurs paramètres de qualité de l'eau ont été mesurés et analysés : Potentiel d'hydrogène (pH), Température (T), Conductivité (CE), Matières en suspensions (MES), demande chimique en oxygène(DCO), Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅), Ammonium (NH₄⁺), Nitrates (NO₃⁻), et Ortho phosphatés (PO₄³⁻).

2. Matériels et méthodes

2.1 Choix des stations d'études et échantillonnage

Pour un échantillonnage plus représentatif de l'Oued Bani Houat, nous avons retenu 7 stations en allant de l'amont vers l'aval, à savoir les stations SO1, SO2, SO3, BO1 (BO1), BO2 (BO2) et BO3 (BO3) (figure 1,

figure 2). Les stations situées en amont (SO1 et SO2) sont exposées directement aux rejets à la fois des eaux usées apurées à partir de la station d'épuration de Sanaa et de l'excédent des eaux usées brutes non traitées qui se déversent dans l'Oued by pass. Les stations BO1, BO2 et BO3 sont sous formes de barrages et leurs eaux sont utilisées pour l'agriculture et l'abreuvement du bétail.

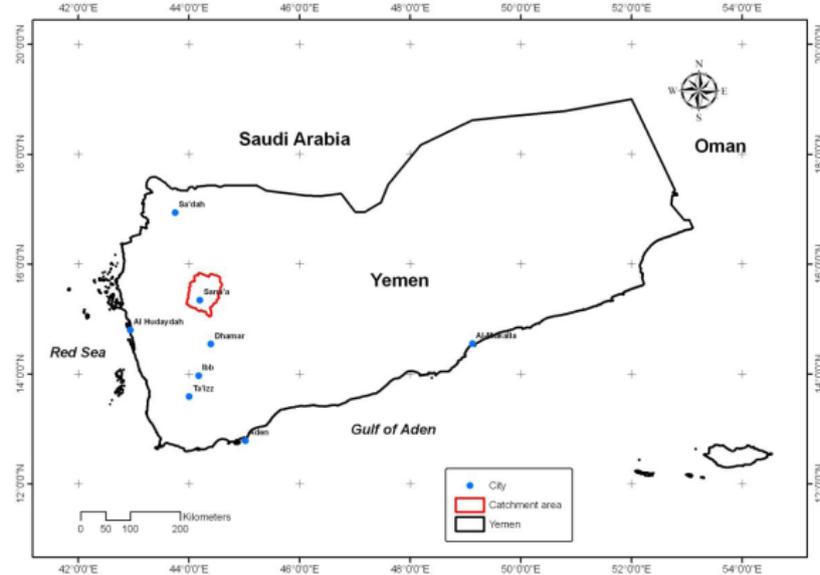


Figure 1. Situation de la zone d'étude au niveau de la carte du Yémen

L'étude s'est déroulée sur une période d'une année de avril 2013 à mars 2014, avec une fréquence de 3 mois, soit un total de 28 échantillons.

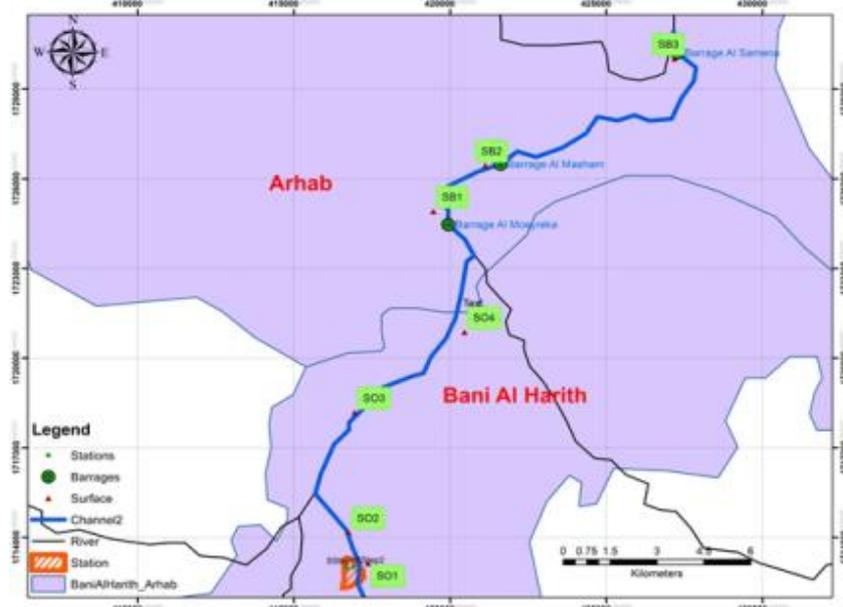


Figure 2: carte de localisation des différentes stations étudiées au niveau de l'Oued Bani Houat de l'amont vers l'aval : SO1, SO2 , SO3, SO4, SB1 (BO1), SB2 (BO2) et SB3 (BO3).

2.2 Méthodes d'analyses

Les paramètres physico-chimiques globaux DBO₅, DCO, MES, NH₄, PO₄ et phénols ont été analysés selon les protocoles expérimentaux décrit par Standard Methods [7]. La demande chimique en oxygène (DCO) est analysée par oxydation en excès au dichromate de potassium à chaud en milieu acide. La DBO₅ a été évaluée par la méthode manométrique basée sur le principe WARBURG (AFNOR, T90-103). Les phosphates sont dosés selon la méthode 8178 appelée phosphore active adaptée de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (0 à 30,00 mg/l). Pour les composés azotés, la mesure a été effectuée à l'aide d'un

spectrophotometer- portable Dotalogying- HACH DR/4000. Le dosage des ions nitrates (NO_3^-) s'est fait par la méthode 8507 à base de l'acide chromotrope (méthode HACH, 4000). Le principe de ce dosage consiste à la réduction des ions nitrates en ions nitrites en milieu acide. Ceux-ci forment une coloration azoïque jaune orange. La mesure a été effectuée à l'aide d'un spectrophotometer- portable Dotalogying- HACH DR/4000. Pour les ions ammonium (NH_4^+), le dosage repose sur la réaction des ions ammonium avec du chlore en milieu alcalin pour former de la monochloramine. Combiné au thymol, celle-ci forme un colorant indophénol bleu. Pour le pH, la température, la conductivité électrique et l'oxygène dissous sur le terrain à l'aide d'appareils électrochimique. Le pH est mesuré à l'aide pH-meters type ELE, la conductivité et la température à l'aide d'un Conductivity-Meter type Benchtop, et pour l'oxygène, il est mesuré par la Méthode de Winkler type OXI 2000 lovibond.

3. Résultats et discussion

3.1 Température de l'eau

Les variations saisonnières de la température des eaux de l'oued sont remarquables : les plus basses ($24,5^\circ\text{C}$) sont enregistrées pendant la saison humide, les plus élevées avec $25,8^\circ\text{C}$ sont observées pendant la saison sèche (tableau 1, figure 2). Cette différence de température montre bien que la température de l'eau est intimement liée à la température de l'air, elles sont plus élevées pendant la saison sèche et elles diminuent pendant la saison humide.

Tableau 1 : Composition physico-chimique moyenne des eaux de différentes stations étudiées de l'Oued Bani Houat.

station	T°C	PH	EC µs/cm	MES mg/l	DO mg/l	BOD5 mg/l	COD mg/l	NH4 mg/l	NO3 mg/l	PO4 mg/l
SO1	25 ± 1,4	7,50 ± 0,39	2570 ± 265	624,75 ± 253	0,073 ± 0,07	961 ± 183	1732 ± 135	85,99 ± 99	144,2 ± 117	80,15 ± 7
SO2	26 ± 1,1	7,26 ± 0,22	2693 ± 180	318,5 ± 79	0,048 ± 0,04	1044 ± 177	1559 ± 72	128,17 ± 85	88,75 ± 87	61,1 ± 9
SO3	26 ± 1,1	7,67 ± 0,15	2540 ± 61	206,5 ± 94	0,055 ± 0,06	76 ± 7	203,75 ± 14	134,65 ± 33	78,55 ± 58	53,75 ± 9
SO4	24 ± 3,8	7,60 ± 0,32	2518 ± 108	283,75 ± 82	0,16 ± 0,17	22,5 ± 3	92,25 ± 9	142,09 ± 25	123,50 ± 56	43,58 ± 28
BO1	25 ± 1	7,55 ± 0,38	2605 ± 336	129,25 ± 67	0,118 ± 0,10	196 ± 71	384,25 ± 126	123,44 ± 45	82,22 ± 66	57,64 ± 33
BO2	24 ± 0,5	7,62 ± 0,25	2448 ± 337	108,5 ± 59	0,083 ± 0,08	240 ± 156	451 ± 275	131,06 ± 10	105,23 ± 100	69,12 ± 38
BO3	25 ± 0,0	7,30 ± 0,15	2052 ± 457	111,25 ± 57	0,27 ± 0,42	203 ± 98	416 ± 254	88,89 ± 36	98,92 ± 25	57,08 ± 15
moyenne	25	7,5	2489	255	0,12	392	691	119	103	60

L'analyse de la variation spatiale de la température le long de l'oued Bani Houat (Tableau 1 et figure 3) montre que les températures des eaux pour les stations situées en amont sont plus élevées avec des valeurs allant jusqu'à 27°C par rapport aux stations situées en aval de l'oued (température maximale est de 25°C). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les stations situées en aval de l'oued sont sous formes de petits barrages (retenue d'eau) et par conséquent cette forme contribue à la diminution de la température par l'augmentation de la surface d'échange thermique avec l'atmosphère. En plus l'hydrodynamique au niveau de l'oued pourrait aussi agir sur la variation de la température, c'est des cascades observées au niveau des stations avales responsables de la baisse de température au niveau de ces stations. Par contre pour les stations situées en amont l'écoulement de l'eau se fait dans un canal (ou rivière) où la surface d'échange thermique avec l'atmosphère est très réduite et les pertes de chaleur sont faibles.

Du fait que la température de l'eau constitue un facteur important dans l'environnement aquatique qui régit presque la totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques [8]. Les valeurs prises par la température des effluents de l'Oued Bani Houat se situent dans une gamme favorable à l'activité microbienne ($< 30^\circ\text{C}$). Ceci favorise le traitement biologique et l'auto-épuration des eaux usées [9], ainsi que le développement et la

croissance des organismes et de la végétation [10] et [11]. Les températures de l'eau mesurées dans toutes les stations de l'oued sont favorables à un équilibre écologique.

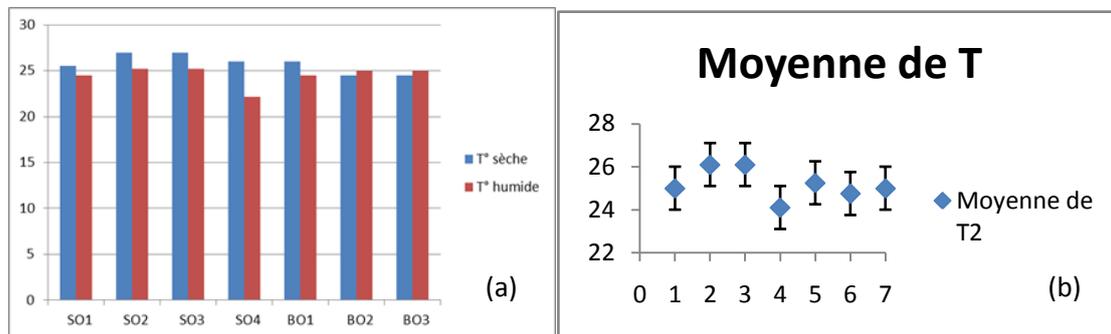


Figure 3: Variations temporelle (a) et spatiale (b) des valeurs de températures des eaux de l'Oued Bani Houat

3.2 Potentiel hydrogène (pH)

L'analyse de l'évolution saisonnière du pH au niveau des eaux de l'Oued Bani Haouat (tableau 1, figure 4) montre que les valeurs moyennes du pH pour les différentes stations étudiées sont presque identiques pour les deux saisons étudiées sèche et humide avec respectivement 7,44 et 7,55 comme valeurs moyennes du pH. Ceci montre que la variation du pH des eaux de l'oued Bani Haouat est indépendante des saisons, ce qui corrobore avec les résultats obtenus par Ben abdellouahad [12]. Ces auteurs ont souligné l'absence de toute action de saisonnalité sur le pH des cours étudiés.

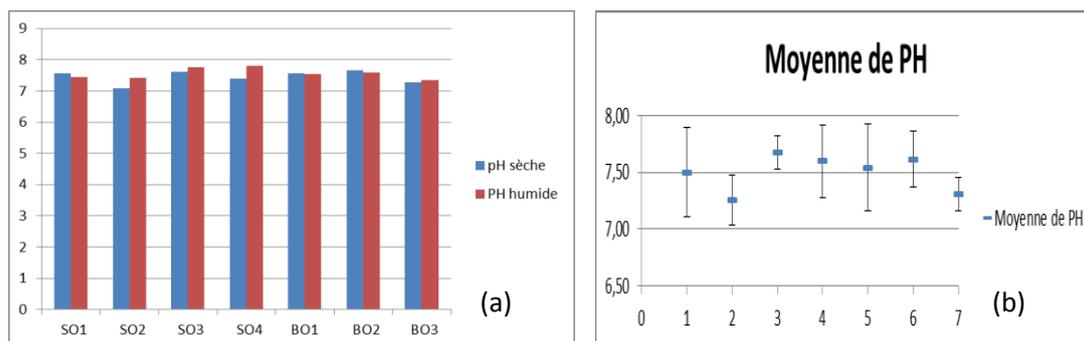


Figure 4: Variations temporelle (a) et spatiale (b) des valeurs de pH des eaux de l'Oued Bani Houat

Les résultats rapportés par les figures (tableau 1 et la figure 4) sur la variation spatiale du pH au niveau des eaux de l'oued Bani Houat montrent que les valeurs du pH présentent un gradient croissant en allant des stations en amont vers les stations en aval, avec 7,35 comme valeur moyenne des deux premières stations (SO1 et SO2), 7,60 valeur moyenne du pH des stations situées au milieu de l'oued (SO3, BO1 et BO2) et une moyenne de 8 pour le pH de la dernière station située en aval de l'Oued.

Les valeurs du pH montrent que les eaux sont légèrement alcalines. Cette alcalinité est liée à la nature des sols et des roches traversées. L'alcalinisation de leurs eaux serait le résultat de l'utilisation du CO₂ lors de la photosynthèse qui s'accompagne par la précipitation des carbonates insolubles [13].

D'une manière générale la gamme de valeurs de pH obtenues (7,3-7,7) au niveau des eaux de l'Oued Bani Houat ne montrent aucun effet défavorable sur la qualité des eaux de surface de l'oued, dont le pH est dans la gamme de 5.5 à 8.5 ([9]; [14]et [15]).

3.3 Conductivité

L'analyse des résultats de la conductivité au niveau des eaux de l'oued Bani Haouat (tableau 1 et figure 5) montre que ces eaux sont fortement minéralisées avec une valeur moyenne de 2489 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et des valeurs extrêmes variant de 2052 $\mu\text{S}/\text{cm}$ comme valeur minimale à 2692 $\mu\text{S}/\text{cm}$ comme valeur maximale. En plus, la conductivité de ces eaux présente des variations saisonnières et spatiales. La forte minéralisation des eaux de l'oued Bani Haouat trouve son explication dans les origines des eaux alimentant les eaux de l'Oued qui sont

principalement anthropiques (rejets des eaux usées épurées, des eaux usées domestiques et industrielles provenant de la ville de Sanâa) et naturelles surtout la nature de terrains lessivés et traversés par les eaux du bassin versant de l’oued Bani Haouat. Nos résultats sur la conductivité sont en accord avec ceux rapportés par Cherak[16]

L’étude de la variation saisonnière des valeurs de la conductivité montre que les faibles valeurs enregistrées en période humide (avec une moyenne de 2329 $\mu\text{S}/\text{cm}$) pourraient s’expliquer par le phénomène de dilution que connaissent les eaux de l’oued pendant cette période. La saison humide au Yémen est connue par de forte précipitation (180 à 220 mm) qui s’abattent sur le pays pendant cette période et entraînant des inondations et des crues responsables de la dilution des eaux de l’Oued et par conséquent une diminution de la conductivité. Par contre, la conductivité des eaux de l’oued Bani Haouat connaît une élévation pendant la saison sèche (avec une moyenne de 2650 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et cela à cause des températures qui sévissent dans la région. Ces températures élevées sont responsables d’une évaporation intense des eaux et par conséquent une élévation accentuée des valeurs de la conductivité des eaux pendant cette période. Nos résultats sont en accord avec les travaux effectués par d’autres auteurs ayant travaillé sur des cours d’eau dans des conditions presque semblables [17]et [18]. L’augmentation de la conductivité pourrait être due à la concentration des eaux en sels minéraux par évaporation et l’augmentation de l’alcalinité [19].

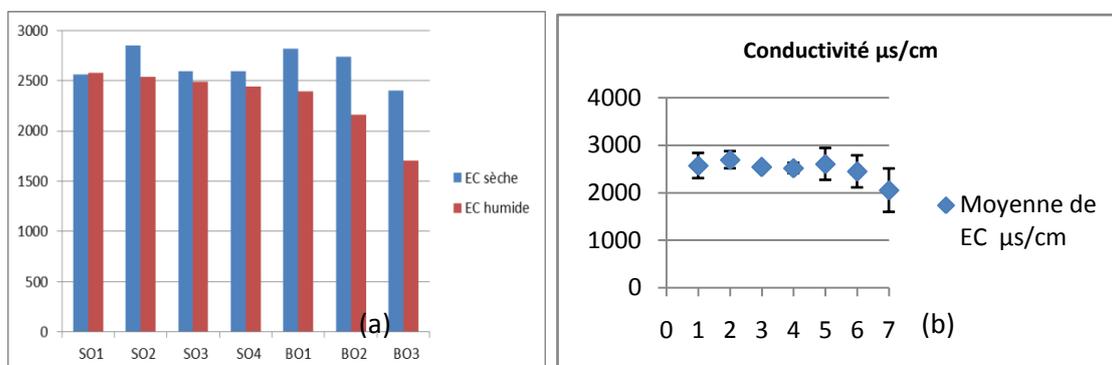


Figure 5: Variations temporelle (a) et spatiale (b) des valeurs de conductivité des eaux de l’Oued Bani Houat

Les résultats de la variation spatiale de la conductivité (tableau 1 et figure 5) montrent que les valeurs de la conductivité oscillent entre 2052 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2692 $\mu\text{S}/\text{cm}$ comme valeurs extrêmes minimales et maximales. La forte minéralisation des eaux enregistrées au niveau des 6 premières stations SO1, SO2, SO3, SO4, BO1 et BO2 serait due d’une part à la qualité des rejets d’eaux usées domestiques brutes et épuré et industrielle riches en éléments minéraux et d’autre part à la nature des terrains géologiques traversés par les eaux dans le bassin versant de l’Oued Bani Houat. Les faibles valeurs de conductivité mesurées au niveau de la dernière station avale de l’oued pourrait s’expliquer par le fait que cette station correspond à une retenue d’eau (ou barrage) qui est alimentée par des résurgences faiblement minéralisées responsables de la dilution des eaux de cette station.

3.4. Oxygène dissous

L’examen de l’évolution saisonnière de la teneur en oxygène dans les eaux de l’Oued Bani Haouat (Tableau 1 et figure 6) montre que les stations avales SO4, SB et BO3 présentent des teneurs élevées au cours de la saison humide avec des valeurs respectives de 0,175 ; 0,095 et 0,450 mg/l comparativement à celles enregistrées pendant la saison sèche pour les mêmes stations avec des valeurs respectives de 0,14 ; 0,07 et 0,09 mg/l (Tableau 1 et figure 6). Ces augmentations des teneurs en oxygène dissous pendant la saison humide seraient essentiellement dues aux variations de la température de l’eau. En fait une eau froide contient une plus grande quantité d’oxygène dissous qu’une eau chaude [20]. En outre, les vitesses des vents engendrent un brassage continu de la masse d’eau et par conséquent un enrichissement de la phase dissoute en oxygène dissous pendant la saison humide. De plus les débits élevés enregistrés durant la saison humide (haute eau) pourraient aussi augmenter l’échange de l’oxygène avec l’atmosphère en facilitant le transfert de l’oxygène vers l’eau et par conséquent l’augmentation de sa teneur dans l’eau. Toutes ces conditions expliqueraient les raisons de l’augmentation des teneurs en oxygène dans les stations SO4, BO1, BO2 et BO3 ayant des crues pendant la saison humide. Cependant, pendant la saison estivale, le réchauffement de l’eau et le faible débit de l’Oued

provoquent une diminution de la dissolution de l'oxygène dissous, aggravée par une augmentation de la consommation de l'oxygène par les organismes vivants dans l'Oued et une chute de la vitesse des vents.

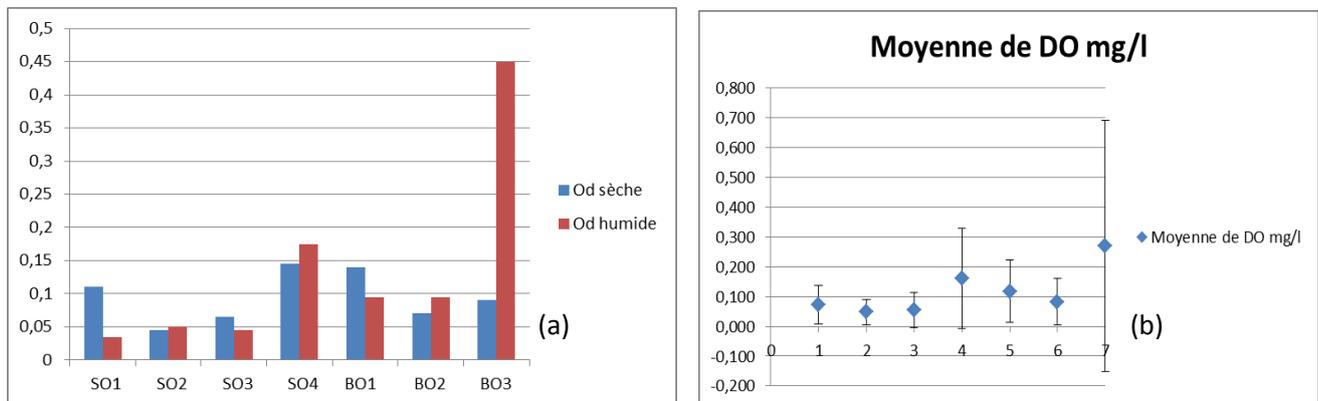


Figure 6: Variations temporelle (a) et spatiale (b) des teneurs en oxygène des eaux de l'Oued Bani Houat

L'étude de l'évolution spatiale de l'oxygène dissous dans les eaux de l'Oued Bani Haouat montre que la teneur en oxygène dissous présente un gradient croissant en allant des stations situées en amont vers les stations situées en aval de l'oued (Tableau 1 et figure 6), avec des teneurs de 0,073 ; 0,048 et 0,055 mg/l respectivement pour SO1, SO2 et SO3 (situées en amont) et des valeurs de l'ordre de 0,160 ; 0,118 et 0,083 mg/l respectivement pour SO4, BO1 et BO2 (situées au milieu et en aval) et enfin des teneurs de l'ordre de 0,250 mg/l pour la station BO3 (dernière station située en aval). Les fluctuations spatiales de la teneur en oxygène dissous dans les eaux de l'Oued Bani Haouat pourraient s'expliquer par le fait que les stations situées en amont (SO1 et SO2) reçoivent les rejets d'eau usée brute et épurée domestiques et industrielles de la ville de Sanâa. Ces rejets contiennent de très grandes quantités de matières organiques biodégradables une fois déversées dans les eaux de l'oued seront oxydées par les bactéries aérobies tout en consommant l'oxygène contenu dans les eaux de l'Oued. Plus les rejets polluants sont riches en matières organiques plus l'oxygène dissous du milieu récepteur diminue d'une façon brutale et peut aboutir des fois à des conditions d'anaérobiose totale ou disparition totale d'oxygène. L'analyse des teneurs en oxygène obtenu dans les eaux de l'Oued Bani Haouat montre bien que nous ne sommes pas très loin de cette situation d'anaérobiose au niveau des stations SO1 et SO2. Ce résultat est en accord avec les travaux de Fekhaoui et Pathee [21]. Par contre en allant vers les stations avales (BO1, BO2 et BO3), la qualité de l'eau de l'oued Bani Haouat s'améliore d'une façon significative par rapport aux stations amont tout en restant dans des proportions très faibles du fait de la persistance de la matière organique à dégrader dans l'eau. Cette amélioration significative de la teneur en oxygène dissous des eaux est un signal du bon déroulement du processus biologique de l'auto-épuration dans les eaux de l'oued qui contribue à la fois à la biodégradation de la matière organique apportée par les rejets polluants et à l'oxygénation des eaux de l'oued Bani Haouat.

3.5 Matières en suspension

Selon nos résultats (tableau 1 et figure 7), la teneur moyenne en MES dans les eaux de l'oued Bani Haouat est de 255 mg/l avec des valeurs extrêmes de 108,5 mg/l et 624,5 mg/l respectivement pour les valeurs minimale et maximale. Les valeurs rencontrées dans cette étude sont du même ordre que celles rapportées par des auteurs ayant travaillé sur des cours d'eau [25],[26] et [27]. Cependant les teneurs en MES présentent des variations saisonnières et spatiales certaines.

L'étude comparative des teneurs en MES entre les saisons sèche et humide (Tableau 1 et figure 7) montre que les eaux de l'Oued Bani Haouat présentent des teneurs élevées en MES en période humide par rapport à la saison sèche avec respectivement 706 mg/l et 543 mg/l au niveau de la station SO1 qui est réceptrice des eaux épurées provenant de la station, des eaux usées brutes et des eaux pluviales évacuées par le réseau d'assainissement de la ville de Sanâa (Tableau 1, figure 6 et figure 7). Cette augmentation de la teneur en MES pendant la saison humide serait due à l'érosion intense du bassin versant de l'Oued Bani par les pluies orageuses qui s'accompagnent de crue et par conséquent un enrichissement des eaux de l'oued en MES surtout au niveau de la station SO1. Plusieurs auteurs ayant travaillé sur des cours d'eau ont rapporté que les eaux des oueds

s'enrichissent en MES pendant la période pluvieuse, ce qui est en accord avec nos résultats avec [17], [18],[25] et [26]. En outre, nos résultats sont comparables à celles observées par Udeigwe[27] et par Kannel et al.[28].

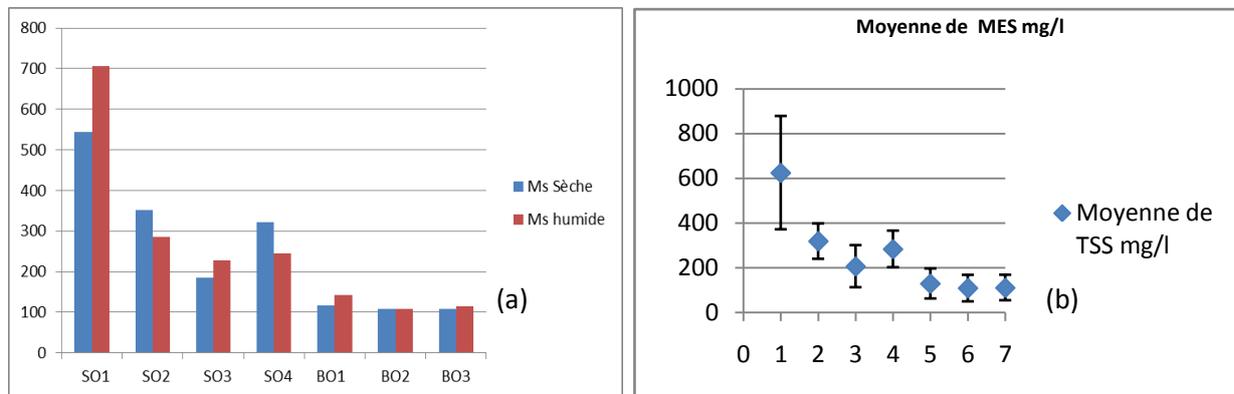


Figure 7: Variations temporelle (a) et spatiale (b) des teneurs en MES des eaux de l'Oued Bani Houat

L'étude de l'évolution spatiale des MES dans les eaux de l'oued Bani Haouat (Tableau 1 et figure 8) montre que les teneurs en MES présentent un gradient décroissant de l'amont vers l'aval, avec 625 mg/l au niveau de la station SO1 en amont et 111 mg/l au niveau de la station BO3 en aval. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le lit de l'Oued Bani Haouat s'élargit au niveau de certains endroits et prend l'allure d'un barrage ou de retenue d'eau surtout au niveau des stations BO1, BO2 et BO3 (en aval de l'Oued). Cette situation crée des zones calmes (ou stagnantes) qui par conséquent favorisent le dépôt des MES par décantation (ou sédimentation) et réduit ainsi leurs teneurs au niveau de l'eau. Les mêmes constatations ont été faites par Dssouli [29] au niveau de l'Oued Issly.

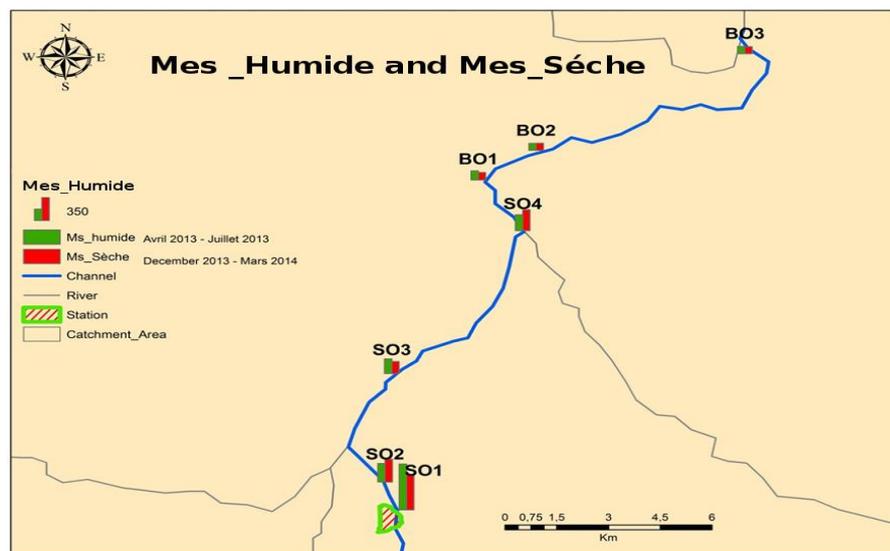


Figure 8: Evolution spatiale des teneurs moyennes des matières en suspension le long de l'oued Bani Houat.

3.6 Demande biochimique en oxygène (DBO₅)

L'analyse des résultats illustrés par le tableau 1 montre que la valeur moyenne de la DBO₅ dans les eaux de l'Oued BaniHaouat durant la période d'étude est de 494 mgO₂/l avec 76 mgd'O₂/l comme valeur minimale et 1043,5 comme valeur maximale. Ce résultat montre que les eaux de l'Oued BaniHaouat sont fortement polluées par la matière organique et dépassent largement les teneurs en matière organique autorisées dans les cours d'eau qui est de 30 mg d'O₂/l (normes yéménites, marocaines et internationales), cette situation pourrait, en général, avoir des effets néfastes sur la qualité de l'eau (chute de la teneur en oxygène) en générale et sur l'écosystème aquatique en particulier. Les origines de l'élévation de la matière organique au niveau de l'oued BaniHaouat seraient les eaux épurées déversées par la station d'épuration des eaux usées dans l'oued et l'excédent des eaux usées brutes non traitées déversées directement dans l'Oued.

Les résultats rapportés par l'étude de l'évolution saisonnière de la teneur en DBO_5 (Tableau 1 et figure 9), montre que les valeurs de la DBO_5 enregistrées durant la période humides sont plus faibles pour la majorité des stations par rapport à celles enregistrées pendant la saison sèche. C'est le cas des stations SO1, BO1, BO2 et BO3 qui présentent les valeurs suivantes respectivement pour les saisons humides et sèches 856 et 1075 mg/l ; 166 et 226 mgd' O_2 /l ; 105 et 374 mg d' O_2 /l ; 126 et 280 mg d' O_2 /l. La diminution de la teneur en matière organique en saison humide pourrait s'expliquer par le phénomène de dilution de la matière organique des eaux usées par les eaux de pluies abondantes dans la région pendant cette saison.

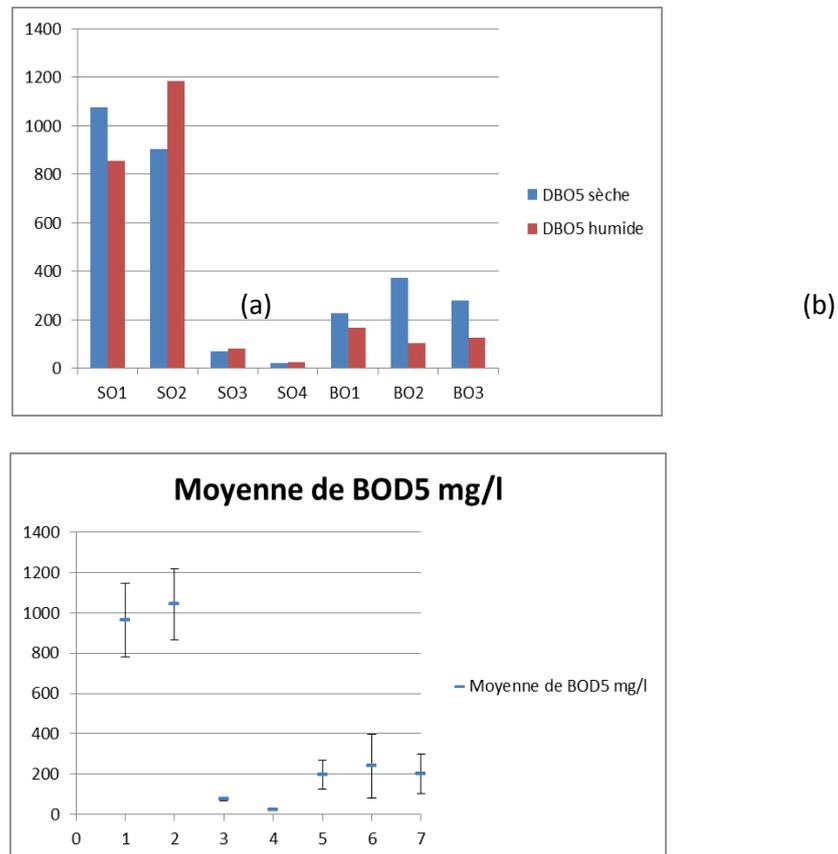


Figure 9: Variations temporelle (a) et spatiale (b) des teneurs en DBO_5 des eaux de l'Oued Bani Houat

Les résultats de l'étude de la variation spatiale de la teneur en DBO_5 (Tableau 1 et figure 10) montrent que l'évolution générale de la DBO_5 présente un gradient décroissant en allant de l'amont vers l'aval.

Ainsi la DBO_5 passe de 967 mg d' O_2 /l au niveau de la première station SO1 en amont à 203 mg d' O_2 /l au niveau de BO3 en aval de l'Oued Bani Haouat. La diminution de la teneur en DBO_5 de l'amont vers l'aval nous renseigne d'une part sur la nature biodégradable de la matière organique et d'autre part sur le degré de réduction de celle-ci par le phénomène d'auto-épuration. Ce phénomène se traduit par la mise en place de processus de biodégradation de la matière organique par des microorganismes présents dans les eaux de l'Oued [30], [31] et [32]. Cette situation nous renseigne sur le bon état de santé de l'écosystème aquatique de l'Oued Bani Haouat.

3.7 Demande chimique en oxygène (DCO) :

L'analyse des résultats obtenus montre que la DCO dans les eaux de l'Oued Bani Houat varie de 92,3 mg d' O_2 /l comme valeur minimale à 1732 mg d' O_2 /l comme valeur maximale avec une valeur moyenne de 691 mg O_2 /l (Tableau 1). Ce résultat montre que les eaux de l'Oued Bani Haouat sont fortement chargées en matière organique biodégradable et non biodégradable (DCO) dépassant largement de 100 à 400 fois la valeur moyenne admissible fixée de 40 mg d' O_2 /L en matière organique autorisée dans les cours d'eau[33]. Cette situation pourrait avoir des effets néfastes sur la qualité de l'eau (chute de la teneur en oxygène) en générale et sur l'écosystème aquatique en particulier. Les origines de cette élévation de la DCO au niveau des eaux de l'oued Bani Houat sont dues à des apports de matières organiques issues des eaux usées domestiques et industrielles

(huiles, substances pharmaceutiques, peinture, etc.) provenant de la ville de Sanaa et évacuées par le réseau d'assainissement jusqu'à la station d'épuration et au niveau de l'oued.

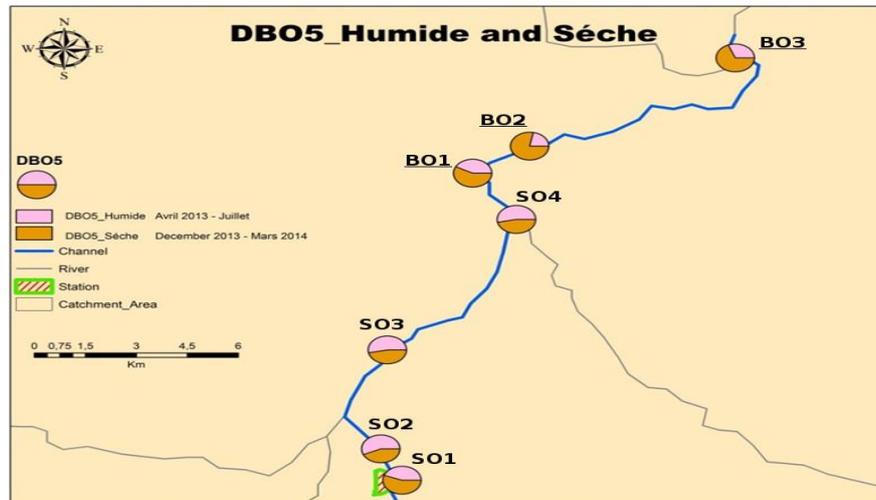


Figure 10: Evolution spatio-temporelle des teneurs moyennes en DBO₅ le long de l'Oued Bani Houat.

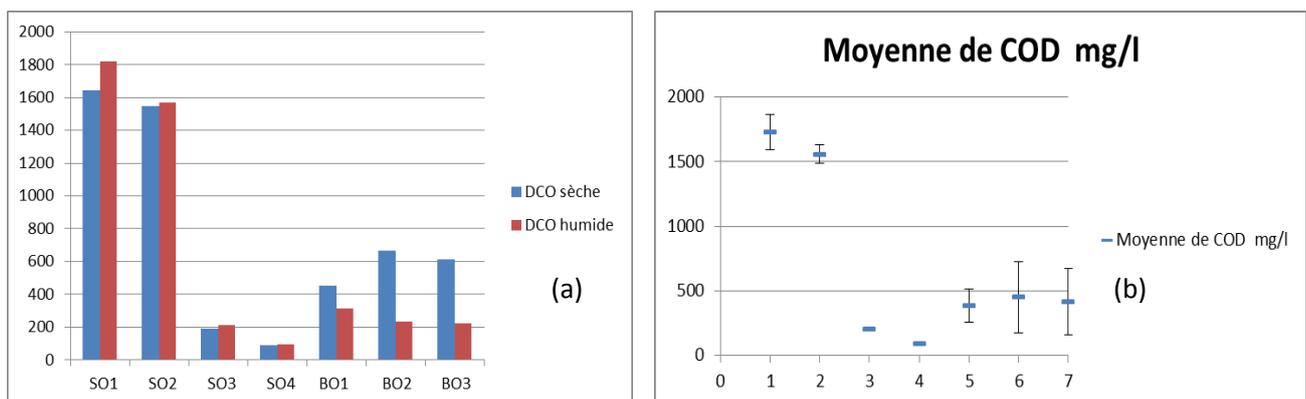


Figure 11: Variations temporelle (a) et spatiale (b) des teneurs en DCO des eaux de l'Oued Bani Houat

L'étude de la variation temporelle de la DCO, montre que la teneur en DCO présente une évolution saisonnière (Tableau 1, figure 11) avec des valeurs basses enregistrées durant la saison humide surtout au niveau des stations situées en aval de l'oued (Tableau 1, Figure 10) et des valeurs élevées enregistrées pendant la saison sèche. C'est le cas des stations BO1, BO2 et BO3 qui présentent les valeurs suivantes respectivement pour les saisons humides et sèches 314,5 et 454 mg d'O₂/l ; 236,5 et 665,5 mg d'O₂/l ; 221,5 et 610,5 mg d'O₂/l. Comme pour la DBO₅, la diminution de la teneur en DCO en saison humide ne pourrait s'expliquer que par le phénomène de dilution de la matière organique les eaux de pluies abondantes dans la région pendant cette saison.

Les résultats de l'étude de la variation spatiale de la teneur en DCO (Tableau 1, figure 11) montrent que l'évolution générale de la DCO présente un gradient décroissant en allant de l'amont vers l'aval. Ainsi la DCO passe de 1732 mg d'O₂/l au niveau de la première station SO1 au niveau de l'Oued à 416 mg d'O₂/l au niveau de BO3 qui correspond à la dernière station située en aval de l'Oued Bani Houat (Tableau 1, figure 10). La diminution de la teneur en DCO de l'amont vers l'aval de la même façon que la DBO₅ nous renseigne que ces deux paramètres sont intimement liés. Ils évoluent dans le même sens car la DBO₅ représente la fraction biodégradable et la DCO mesure à la fois la fraction biodégradable et la fraction non biodégradable. Le long de l'Oued Bani Houat, la fraction biodégradable de la DCO est soumise au phénomène d'auto-épuration qui contribue à la réduction de cette fraction par oxydation biologique par des microorganismes présents dans les eaux de l'Oued ([33], [34], et [35]). La fraction particulière et non biodégradable de la DCO est soumise à des phénomènes physiques telle que leur décantation le long de l'oued et surtout au niveau des petits barrages qui jouent le rôle de décanteur ce qui par conséquent réduit leur teneur au niveau de l'eau de l'oued.

3.8 Orthophosphates

L'analyse des résultats montre que les concentrations en orthophosphates (PO_4^{3-}) dans les eaux de surface de l'Oued Bani Houat (Tableau 1, figure 12) varient entre 43,58 mg/L au niveau de la station SO4 et 80,15 mg/L comme valeur maximale au niveau de la station BO2. Les fortes teneurs en PO_4^{3-} au niveau des eaux de l'Oued Bani Houat est un indicateur d'une pollution des eaux par les rejets d'eaux usées d'origines domestiques et industrielles [33]. Elles dépassent de plus de 80 fois la teneur limite de 1 mg/l autorisée dans les écosystèmes aquatiques afin de limiter le phénomène d'eutrophisation [34].

L'analyse des résultats de la variation saisonnière de la teneur en phosphates dans les eaux de l'Oued Bani Houat (Tableau 1, figure 12) montre que la teneur en phosphates est élevée pour la majorité des stations en saison humide par rapport à celle enregistrée en saison sèche avec respectivement 85,71 et 74,6 mg/L pour SO1, 69,2 et 53 mg/L pour SO2, 60 et 47,5 mg/L pour SO3, 44,66 et 42,5 mg/L pour SO4 et 72,2 et 66 mg/L pour BO2. Ces importantes variations dans la concentration en orthophosphates (PO_4^{3-}) dans les eaux de l'Oued entre la saison humide et la saison sèche résulteraient le plus souvent des pluies intenses que connaît la région pendant la saison humide, de telles pluies sont responsables des crues et du lessivage des sols du bassin versant de l'Oued Bani Houat qui constitue la principale source en orthophosphates provenant de la décomposition de la matière organique ou des engrais chimiques utilisés en agriculture. Selon Heaton [35] les agents atmosphériques vent et pluie représentent des sources de phosphates pour les eaux superficielles.

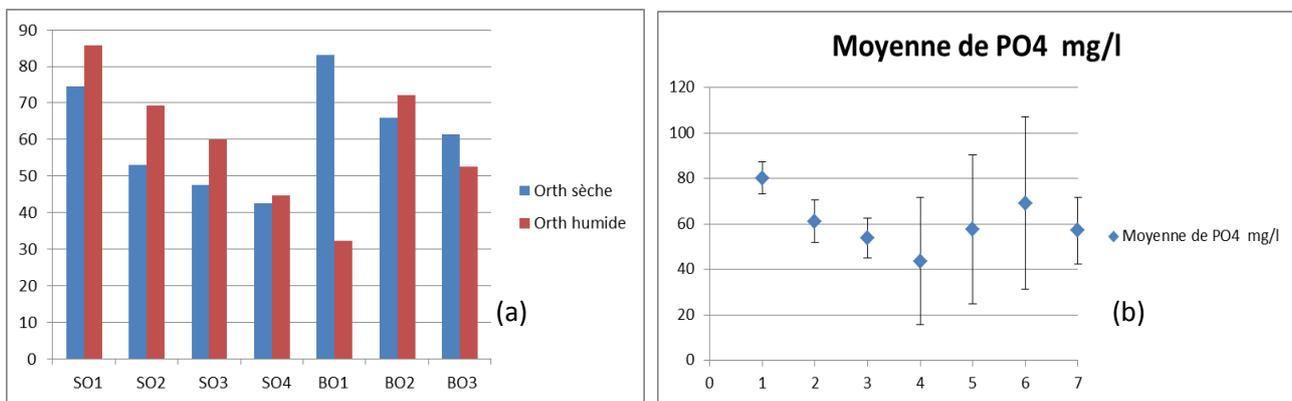


Figure 12: Variations temporelle (a) et spatiale (b) des teneurs en PO_4^{3-} des eaux de l'Oued Bani Houat

L'évolution spatiale de la teneur en orthophosphates dans les eaux de l'Oued Bani Houat (Tab1, Fig 12) rapporte que la teneur présente un gradient décroissant en allant de la station SO1 située en amont jusqu'à la station SO4, avec respectivement 80,15 mg/l pour SO1 ; 61,10 mg/l pour SO2 ; 53,75 mg/l pour SO3 et 43,58 mg/l pour SO4 puis nous assistons à une augmentation de la teneur en PO_4^{3-} pour les stations BO1, BO2 et BO3 situées en aval (Tableau 1, figure 12) avec respectivement 57,64 mg/l pour BO1 ; 69,11 mg/l pour BO2 et 57,08 mg/l pour BO3. La phase de décroissance de la teneur des PO_4^{3-} au niveau des premières stations seraient dues d'une part à l'assimilation des phosphates par les algues aquatiques lors des phénomènes de photosynthèse et d'autre part à des assimilations bactériennes qui se déroulent dans les eaux lors des processus de l'auto-épuration [18]. Cependant des phénomènes physico-chimiques pourraient entraîner la diminution de la teneur des phosphates par processus de précipitation chimique avec les ions calcium. Par contre l'augmentation de la teneur en phosphates au niveau des stations situées en aval de l'Oued (BO1, BO2 et BO3) serait due à la nature de ces trois stations qui sont sous formes de barrages ou de retenues d'eau avec des profondeurs plus au moins élevées. De telles conditions favorisent le déroulement des phénomènes d'anaérobiose au niveau des sédiments déposés au fond de ces stations, ils sont responsables de la dégradation de la matière organique et par conséquent le relargage des ions phosphates dans les couches supérieures de la retenue d'eau. Nos résultats sont en accord avec ceux de Bennabou [18].

3.9 Ammonium (NH_4)

L'évolution des teneurs en ammonium dans les eaux de l'Oued Bani (Tableau 1, figure 13) montre que les teneurs en ion ammonium varient de 86 mg/l comme valeur minimale à 142 mg/l comme valeur maximale et une valeur moyenne 119,18 mg/l.

L'analyse des résultats de la variation de la teneur en ion ammonium au niveau de l'Oued Bani Houat (Tableau 1, figure 13) montre que les eaux de l'oued présentent des valeurs élevées pour la plupart des stations pendant la saison sèche par rapport à celles enregistrées pendant la saison humides avec respectivement 170,64 et 1,34 mg/l pour SO1 ; 171,63 et 84,71 mg/l pour SO2 ; 150,80 et 118,50 mg/l pour SO3 et 136 mg/l et 126,13 mg/l pour BO2. Les variations enregistrées de la teneur en ion ammonium pourraient s'expliquer par d'une part le phénomène de dilution de l'ammonium pendant la saison humide (saison des pluies) et d'autre part la bonne oxygénation des eaux entraînant l'oxydation de l'ammonium. Ces deux phénomènes sont responsables des faibles teneurs en ions ammonium relevées pendant la période humide.

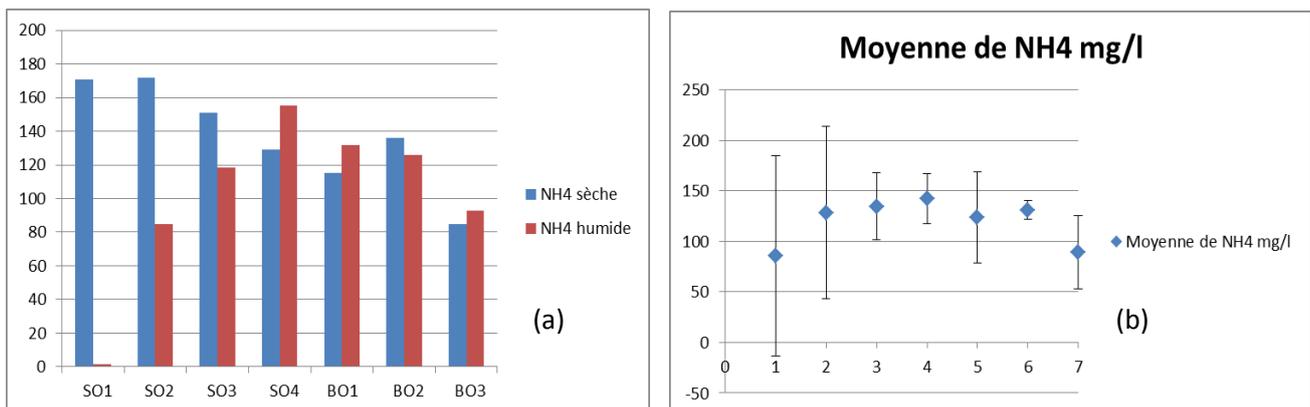


Figure 13: Variations temporelle (a) et spatiale (b) des teneurs en NH_4^+ des eaux de l'Oued Bani Houat

L'étude de la variation spatiale de la teneur en ion ammonium dans les eaux de l'oued Bani Houat (Tableau 1, figure 13) présente un gradient croissant en allant de la station SO1 à la station SO2 avec les valeurs suivantes : 85,99 mg/l pour SO1 ; 128,17 mg/l pour SO2 ; 134,65 mg/l pour SO3 et 142,09 mg/l pour SO4. Au-delà, la teneur en ammonium chute au niveau des stations BO1 et BO3 avec respectivement 123,44 mg/l et 89 mg/l. La présence du gradient croissant de la teneur en ammonium au niveau des stations amont (SO1, SO2, SO3 et SO4) serait surtout due au phénomène d'auto-épuration qui prend naissance dans ce cours d'eau. Ce phénomène est responsable de la dégradation de la matière organique azotée par l'action des bactéries et par conséquent l'enrichissement de l'eau en ions ammonium. Par contre la diminution de la teneur en ammonium dans les eaux des stations situées en aval (BO1, BO2 et BO3) est dû d'une part à l'assimilation de l'ammonium par photosynthèse algale suite phénomène d'eutrophisation qui succède à l'auto-épuration une fois l'écosystème est enrichi en dioxyde de carbone, en ion ammonium et en phosphates[18]et d'autre part à la dilution de l'ammonium à cause de l'apport d'eau douce par les résurgences qui apparaissent au niveau de ces stations BO1, BO2 et BO3 (retenues d'eau ou barrages).

3.10 Nitrates

Le suivi de la teneur en nitrates (NO_3^-) dans les eaux de l'Oued Bani Houat (Tableau 1, figure 14) montre que les teneurs en NO_3^- présentent une valeur moyenne de 103,06 mg/L et des valeurs extrêmes qui varient de 78,55 mg/L (SO3) comme valeur minimale à 144,22 mg/L (SO1) comme valeur maximale. Les fortes teneurs en nitrates enregistrées au niveau de l'Oued Bani Houat pourraient s'expliquer par l'usage excessif des engrais pour l'agriculture [36],[37] et[12]aux apports des eaux pluviales qui lessivent les terrains avoisinant l'Oued Bani Houat. Ces teneurs élevées sont dues aussi aux rejets à la fois des eaux épurées riches en NO_3^- provenant de la station d'épuration des eaux usées (rejet de l'effluent épuré au niveau de SO1) et des eaux usées brutes provenant de la ville de Sanaa (rejet by-pass au niveau de SO2). En outre les résurgences des eaux souterraines au niveau des stations situées en aval chargées en NO_3^- contribuent à l'enrichissement de ces stations en nitrate c'est le cas des stations BO1, BO2 et BO3 qui sont en partie alimentées par les eaux souterraines (Tableau 1, figure 14). Dans les cours d'eau superficielle, les nitrates sont d'origines multiples : engrais azotés, résidus animaux, fumier, minéralisation de la matière organique, les effluents urbains et industriels, etc. Les décharges sauvages, souvent observées sur des terrains avoisinant, peuvent aussi véhiculer des quantités importantes en profondeur à travers leurs lixiviats en l'absence totale de système d'étanchéité [38]. Vu le danger que peuvent présenter les nitrates dans l'eau de boisson, risque de méthémoglobinémie (cyanose) [42], et de formation de

nitrosamines (carcinogènes), la valeur maximale admissible de cet aliment a été fixée à 50 mg/L par la majorité des normes internationales. Cette valeur es fixée par les normes américaines à 45 mg/L [39] et [40]. L'analyse des résultats des NO₃ (Tableau 1, figure 14) montre que les teneurs présentent une évolution saisonnière marquée par l'enregistrement de valeur maximale en saison sèche pour la plus part des stations en amont et en aval par rapport aux valeurs enregistrées en période humides (à l'exception des deux stations situées au milieu de l'Oued (SO4 et BO1) qui montre une évolution inverse aux premières).

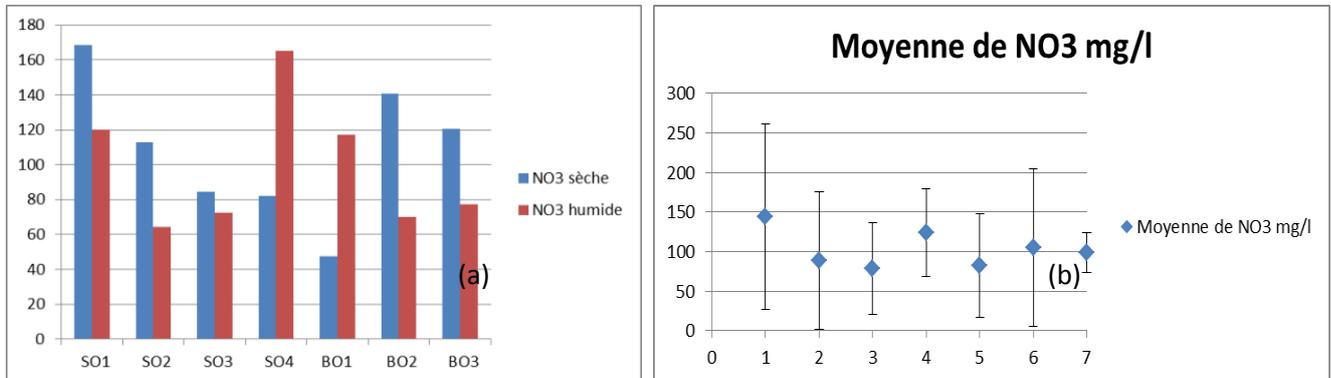


Figure 14: Variations temporelle (a) et spatiale (b) des teneurs en NO₃ des eaux de l'Oued Bani Houat

Les valeurs enregistrées respectivement pour les saisons sèches et humides sont 168,50 mg/L et 119,90 mg/L ; 113 mg/L et 64,50 mg/L ; 84,50 mg/L et 72,60 mg/L ; 140,50 mg/L et 70mg/L et 120,50 mg/L et 77,30 mg/L (Tableau 1, figure 14). Cette élévation de la teneur en NO₃⁻ pendant la saison sèche pourrait s'expliquer par le fait qu'au cours du phénomène d'auto-épuration la dégradation de la matière organique s'accompagne d'une production intense des sels nutritifs et principalement les nitrates qui s'accumulent et par conséquent entraîne leur augmentation dans les eaux de l'Oued [20]. Par contre pendant la saison humide les nitrates produits par phénomène d'auto-épuration se trouvent diluer par les eaux de pluie qui sont très abondantes pendant cette période. Cependant les deux stations SO4 et BO1 font exception et présentent des teneurs élevées en périodes humides par rapport aux périodes sèches avec respectivement 165,10 mg/L et 81,82 mg/L pour SO4 et 116,90 mg/L et 47,50 mg/l pour BO1. L'augmentation de la teneur en NO₃⁻ au niveau de ces deux stations pendant la saison humide pourrait s'expliquer par le fait que d'une part la station SO4 (très proches de BO1) reçoit des déversements d'eaux usées par camions citernes d'origines inconnues (Fuentes de volaille par exemple) et qui pourraient contenir des teneurs élevées en NO₃ et d'autre part les deux stations présentent une topographie différentes des autres stations (faibles pentes) et par conséquent pourraient recevoir les eaux pluviales qui lessivent les terrains agricoles avoisinant riches en NO₃⁻. Certains auteurs ayant travaillé sur des cours d'eau ont montré que la teneur en NO₃⁻ est plus importante en période humide que pendant la saison sèche comme le montre nos résultats pour les deux stations du milieu SO4 et BO1 [17] et [18].

Conclusion

L'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux du bassin versant de l'Oued Bani Houat montre que la qualité de ces eaux se trouve fortement influencée par les activités anthropiques. Celles-ci contribuent à la dégradation de la qualité des eaux du bassin versant par les rejets domestiques bruts et épurés et industriels essentiellement les huiles industrielles, les produits pharmaceutiques, peintures, agro-alimentaire, En outre, les engrais et les pesticides utilisés en agriculture apportent une pollution significative, dans les eaux de l'oued Bani Houat du Bassin de Sanaa.

Le suivi spatio-temporel de plusieurs paramètres physico-chimiques nous a fourni l'image d'une pollution relativement intense qui se traduit par une importante charge minérale et organique pendant la saison sèche dans les eaux des stations situées en amont de l'oued SO1 et SO2). Ces stations amont reçoivent directement les rejets urbains et industriels bruts et épurés. L'ensemble des stations étudiées présentent une dilution des eaux de l'Oued Bani Houat pendant la période des pluies (saison humide).

L'étude de la qualité physico-chimique des eaux du bassin versant de l'Oued Bani Houat, montre que pour l'ensemble des polluants caractérisant la pollution organique et particulaire (DBO₅, DCO, MES) présentent un gradient décroissant en allant des stations amont vers les stations aval. Cette décroissance de la pollution est une conséquence du phénomène d'auto-épuration qui a permis de réduire l'impact des pollutions domestiques et industrielles au niveau des eaux de l'oued. Grâce à ces phénomènes biologiques, la qualité de l'eau des stations aval s'est nettement améliorée avec une bonne oxygénation et une diminution de la DBO₅, de la DCO, des MES. Les résultats de cette étude montrent que les eaux de l'Oued Bani Houat conservent encore les spécificités d'un écosystème aquatique naturel. Cependant, la persistance des rejets polluants domestiques et industriels contribuerait à la dégradation totale de la qualité de l'oued.

Références

1. Rageh A., *International Journal of Environment and Sustainability*, 3(1) (2014) 7-13
2. Stephen F. Counterpart Organizations: Ministry of Planning & Development (MOPD) and Sana'a Basin Water Management Program (SBWMP), (2003),
3. Raweh S., Belghyti D., AL-Zaemey A., EL Guamri Y. et ELKharrim K., *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 5(1) (2011) 1-10.
4. PACER Consultants, *Studies & design the reuse of wastewater from Sanaa wastewater treatment plant*. (2006).
5. Abd Al-Rahman Haidar. Dar Al-Kutub Ministry of Culture- Sanaa, (2005) 397.
6. Al-Eryani A. A.; Al-Nozaily F.A.; and Al-Muselehi S.W.H., *WSWIM-Sustain Water MED, Regional Conference on: Sustainable Integrated Wastewater Treatment & Reuse in the Mediterranean, Sharm El Sheikh, Egypt*,(2014), 77
7. American Public Health Association, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA/AWWA/WEF, 19th ed.* ISBN 0-87553-235-7 (1999),
8. Chapman D., Kimstach V. *Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London*, ISBN 0 419 21590 5 (HB) 0 419 21600 6 (PB), (1996). 59-126.
9. Journal Officiel de Yemen. *JO. N° 46 du 14 Juillet*, (1993), 5
10. Marschner, H. *Mineral nutrition of higher plants. 2nd edition Academic press, NY*. ISBN-13: 978-0-12384-905-2 et ISBN-10: 0123849055, (1995),
11. Fadli M. *Doctorat Univ. Ibnou Tofail Kénitra*, (2003) 148.
12. Benabdellouahad S.; *Thèse, Université Mohammed V- Agdal. Rabat*,(2006) 252.
13. Bontoux J. *Introduction à l'étude des eaux douces : eaux naturelles, eaux usées, eaux de boisson. Qualité et santé, CEBEDOC, sprl, Liège, 2ème édition*,(1993). ISBN 978-2-87080-024-9,167.
14. Nisbet M.,Verneaux J.,*Ann.Limnol. (A.L. – I. J. L.)*,6,2,16, (1970) 161-190.
15. Arrignon J., *Aménagement écologique et piscicole des eaux douces J. Editions Gauthier-Villars, Paris*. ISBN 10 : 2040109285/ ISBN 13 : 978-2-04010-928-8, (1976),
16. Cherak L., *Thèse magister, Université de Batna (Algérie)*. (1999) 110.
17. Benmoussa A., *Thèse, Université Moulay Ismail, Mekkès*. (2014)
18. Bennabou M. El Haji M., Zemzami M., Bougarne L. et Fadil F.,*International Journal of Innovation and Scientific Research(IJISR)*, 10, 2 (2014) 282-294.
19. Laville E., et Faden B. *Sc. Géol., Mémo.* 84 (1989) 3-28.
20. Hébert, S. et S. Légaré., *envirodoq n° ENV-2001-0141, rapport n° QE-123* (2000) 24
21. Fekhaoui M., Pattee E.. *Bull. Ins.Sci.(Rabat)*, 17 (1993) 1-12.
22. Ben moussa A., Chahlaoui A., Rour E., Chahboune M. et. Karraouan A. B., et Bouchrif B., *Lebanese Science Journal (Leb. Sci. J.)*, 15, No. 2, (2014)
23. Aboulkacem A. *Thèse d'État, Fac. Sciences. Meknès (Maroc)*. (2007) 159.
24. Lamrani H., Chahlaoui A., El addouli J. et Ennabili A., *ScienceLib Éditions Mersenne : Volume 4, N° 120303. ISSN 2111-4706*.(2012).
25. Rohatgi N., Chen.K.Y. (1975). *J.W.P.C.F.*, 47, n°9, (1975) 2298-2316.
26. El Kettani S. et Azzouzi EM. *Cahiers Santé* 16(4) : (2006) 245-251
27. Udeigwe T K, Eze P N, Teboh J M, et al. *J. Environment International (IJEP)*, 37(1) (2011) 258-267

28. Kannel P.R., Lee S., Kanel S.R., Khan S.P. and Lee Y.S. *Environmental Monitoring and Assessment (Environ Monit Assess)*, 129 (1-3), (2007). 433-459.
29. Dssouli K. *Thèse, Université Mohammed Premier, Faculté des Sciences, Oujda.* (2002) 133.
30. Parinet, B.; Lhote, A. et Legube, B. *Ecological Modelling.* 178(3- 4), (2004) 295-311.
31. Baker, A. *Hydrol. Process.(HYDROL PROCESS)*, 17, (2003), 2499–2501.
32. Makhoukh M., Sbaa A., Berrahou1 M., Van. Clooster. *Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 09* (2011) 149-169.
33. MEE: *Normes Marocaines d'Environnement*, (2008).
34. El Halouani H., Picot B., Casellas C., Pena G. et Bontoux J. *Revue Sciences de l'Eau* 6 (1993) 47-61.
35. Heaton, R. D. *Worldwide Aspect of Wastewater Reclamation and Reuse*, (1981), 43-76 In: F. M. D'Itri, J.Aguirre-Martinez, and M. Athle-Lambarri. *Municipal Waste-Water in Agriculture, AcademicPress, New York*, ISBN 13: 97-8-01221-488-04
36. Dumontier M, Dethier M, Revaclier R, Balikungeri A. *Bull. Mens. Soc. Linn. Lyon*, 9 (1995) 411-422.
37. Neal C, Jarvie HP, Howarth SM, Whitehead PG, Williams RJ, Neal M, Harrow M, Wickham H.. *The Science of the Total Environnement(SCI TOTAL ENVIRON)*, 251-252 (2000) 477- 495.
38. Bettahar N., Benamara A., Kettab A. et Douaoui A., *Revue des Sciences de l'Eau* 22(1) (2009) 69-78,
39. Fan, A.M. Willhite, C.C., and Book, S.A. *Regul. Toxicol. Pharmacol (REGUL TOXICOL PHARM)*. 7, (1987), 135-148.
40. Aït boughrous A., *Thèse, Université Cadi Ayyad, Marrakech*, (2007) 207.

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosci.com>